DOI:10.11931/guihaia.gxzw201810039

西双版纳地区主要森林植被乔木多样性的时间变化

杨建波[1,2,3]，马友鑫[1,2*]，白杨[1,2]，曹慧[1,2,3]

（1.中国科学院西双版纳热带植物园，云南 西双版纳 666303；2.中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心，云南 西双版纳 666303；3.中国科学院大学，北京 100049）

摘要：生物多样性评估为区域可持续发展提供重要参考。为了评估云南省西双版纳森林植被乔木多样性的时间变化，通过样方调查收集了该地区 4 种主要森林植被（热带雨林、热带季节性湿润林、热带山地常绿阔叶林和暖热性针叶林）乔木多样性数据；结合遥感影像提取了该地区 4 种森林植被在 1992、2000、2009 和 2016 年 4 个时期的分布；用 Simpson，Shannon-Wiener 和 Scaling 物种多样性指数对比 4 种森林植被乔木均匀度差异；利用 Scaling 生态多样性指数和灰色关联评价模型，评估该地区在 4 个时期的森林乔木多样性的时间变化。结果表明：（1）森林面积比例变化有先减少后增加的趋势，表现为由 1992 年的 65.5%减少至 2000 年的 53.42%，减少到 2009 年的 52.49%，再增至 2016 年的 54.73%，但是热带雨林呈持续减少的趋势；（2）4 种森林植被对乔木多样性的贡献有明显差异，均匀度排序是热带雨林>热带山地（低山）常绿阔叶林>暖热性针叶林>热带季节性湿润林，丰富度排序是热带雨林>热带山地（低山）常绿阔叶林>热带季节性湿润林>暖热性针叶林，对乔木多样性贡献的排序是热带雨林>热带山地（低山）常绿阔叶林>热带季节性湿润林>暖热性针叶林；（3）热带雨林和热带季节性湿润林乔木多样性呈现持续减少趋势，4 个时期西双版纳森林植被乔木多样性排序为 1992 年>2009 年>2016 年>2000 年。研究表明，经济活动是影响西双版纳生物多样性的重要原因，保护热带雨林对维持该地区生物多样性具有重要意义。

关键词：西双版纳，乔木多样性，森林植被，遥感，Scaling 生态多样性指数，灰色关联评价模型

中图分类号：Q948　　　　**文献标识码**：A

Temporal change in tree diversity of main forest vegetation types in Xishuangbanna, SW China

YANG Jianbo[1,2,3], MA Youxin[1,2*], BAI Yang[1,2], CAO Hui[1,2,3]

(1. *Xishuangbanna Tropical Botanical Garden*, *Chinese Academy of Sciences*, Xishuangbanna 666303, Yunnan, China; 2. *Center for Integrative Conservation*, *Xishuangbanna Tropical Botanical Garden*, *Chinese Academy of Sciences*, Xishuangbanna 666303, Yunnan, China; 3. *University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract: Biodiversity assessment provides reference for regional sustainable development. To estimate temporal change of regional tree diversity in Xishuangbanna, Southwest China. For this, we selected sampling plots from four forest vegetation types through field survey, including

基金项目：国家自然科学基金（41501580）；中国科学院战略性先导科技专项（XDA05050206）[Supported by National Natural Science Foundation of China (41501580); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05050206)]。

作者简介：杨建波（1992-），男，白族，硕士研究生，从事景观与植被生态学研究，（E-mail）yangjianbo@xtbg.ac.cn。

***通信作者**：马友鑫，博士，研究员，主要从事景观生态学研究，（E-mail）may@xtbg.ac.cn。

tropical rainforest (TRF), tropical seasonal moist forest (TSMF), tropical lower montane evergreen broad-leaved forest (TEBF) and tropical coniferous forest (COF). We used remote sensing imageries to map the distribution of four forest vegetation types for four different time periods 1992, 2000, 2009, 2016. Evenness indices of Simpson, Shannon-Wiener and Scaling were used to compared the tree evenness difference among the four forest vegetation types, Scaling index and grey correlational evaluation model were used to measure the biodiversity change in Xishuangbanna in four periods. The study shows that: (1) Forest area shows a decreasing trend during 1992 to 2009 and then increasing to 2016, proportion of changing forest area was found to be 65.5% in 1992 decreasing to 53.42% in 2000, then keeping 52.49% in 2009 and increasing to 54.73% in 2016, but TRF area shows a decreasing trend during 1992 to 2016. (2) Four forest vegetation types has a significant difference that contributes to biodiversity, the tree evenness of four forest vegetation types are in the order TRF> TEBF> COF> TSMF, the richness of four forest vegetation types are in the order TRF> TEBF> TSMF> COF, this sorting of vegetation's contributions to Xishuangbanna tree diversity are TRF> TEBF> TSMF> COF. (3) Tree diversity of TRF and TSMF shows a decreasing trend from 1992 to 2016, the tree diversity of Xishuangbanna forest vegetation in different time periods are sorted as 1992> 2009> 2016> 2000. The present study indicates that economic activity is an important factor to affecting the regional diversity in Xishuangbanna, conservation of tropical rainforest has a great significance in maintaining biodiversity in Xishuangbanna.

Keywords: Xishuangbanna, tree diversity, forest vegetation, remote sensing, Scaling diversity index, Grey correlational evaluation model

生物多样性的评估可以了解地区生物多样性现状和变化趋势，为政府对地区生物多样性保护和可持续发展的决策提供科学依据（环境保护部生物多样性保护办公室，2010）。目前对区域生物多样性评价的方法可以分为频度分析法和遥感反演法。频度分析法是通过筛选植物物种、动物物种、生态系统类型、外来物种等实用性指标，通过专家咨询的方法设置权重，以此对比不同地区之间生物多样性的情况，这种方法主观性较强且缺少进一步的科学量化，而且区域生物多样性评价体系和方法没有统一，不同区域之间的评价结果没有很好的可比性（傅伯杰等，2017）。遥感技术具有的多时空和多光谱特点，为区域生物多样性的监测、评价提供了新途径（李文杰和张时煌，2010）。目前利用遥感数据可以对物种或生境制图，建立地表物种多样性与遥感光谱的关系模型，遥感解译出的土地利用图进行景观指数分析，对地区生物多样性进行评价和监测（徐文婷和吴炳方，2005；胡海德等，2012）。遥感虽然能够为研究区域生物多样性评价提供面积、结构和物种类型等信息，但是对区域生物多样性评价还需要借助地理信息技术和数学模型（岳天祥，2000），所以提出了 Scaling 生态多样性指数（Yue et al., 2005）。Scaling 生态多样性指数是由物种均匀度和面积两部分构成，它是区域内物种均匀度、物种丰富度和面积的综合反映，指数越大生态多样性就越高（Yue et al., 2007）。

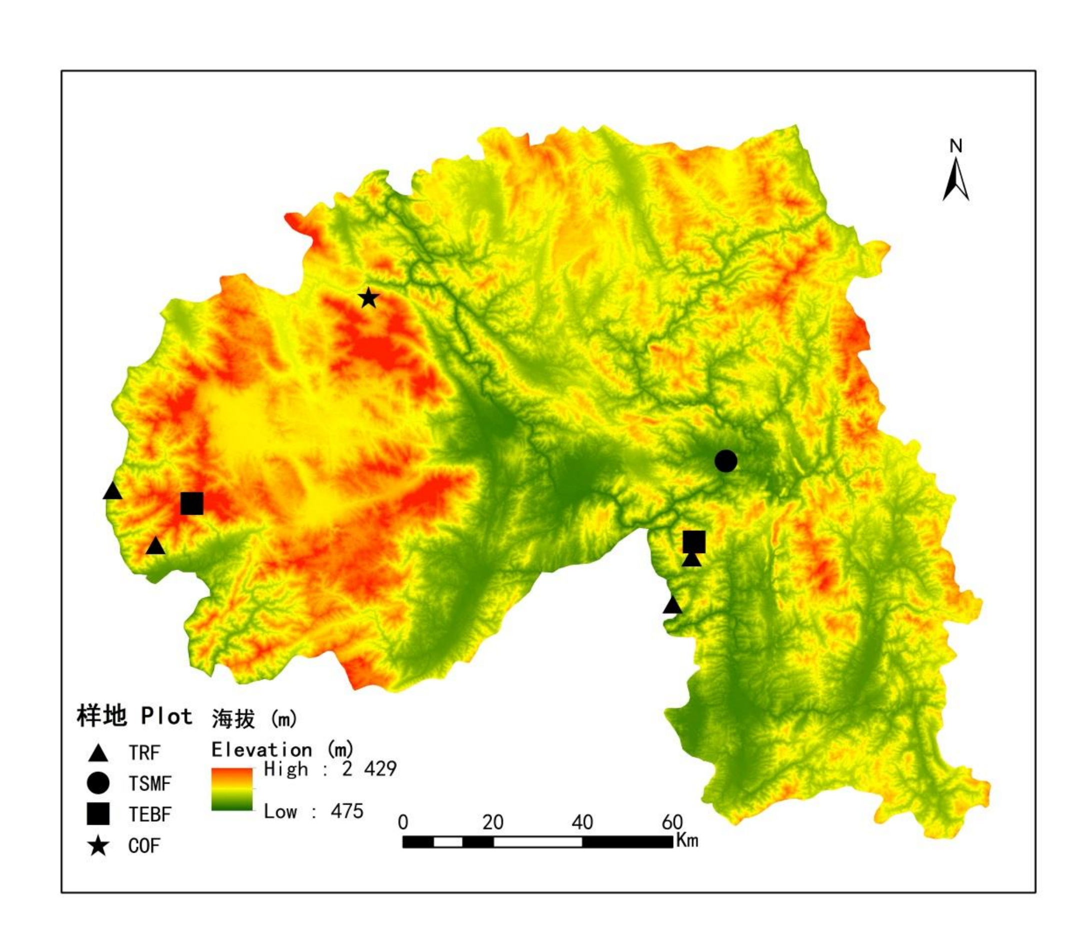
位于云南南部的西双版纳是生物多样性热点分布区（Myers et al., 2000），在国土面积仅为全国面积 0.2%的土地上，生存着中国近 20%的兽类和鸟类，以及 5000 多种植物（刘宏茂等，2001）。然而，自 1976 年以来西双版纳地区天然林不断减少，而橡胶林、茶园和农业用地则不断增加（Li et al., 2007；刘晓娜等，2014），其中橡胶林是导致该地区热带雨林生物多样性丧失的直接原因（李增加等，2008；Li et al., 2007）。土地利用变化引起的热带雨林森林破碎化比其他森林植被的破碎化更严重（Li et al., 2009），也导致了热带雨林群落组成和结构变化（朱华等，2001）、树种多样性（Liu et al., 2014）的丧失。虽然诸多学者用多种手段证明了西双版纳地区的生物多样性在不断丧失，但仅用遥感手段难以解释植被之

间的差异（Li et al., 2007, 2009）；而群落调查（朱华等，2000，2001；Liu et al., 2014）手段难以反映整个地区的生物多样性情况，目前关于西双版纳地区生物多样性时间变化的研究还较少。

本文以西双版纳为研究区，在样方调查不同森林植被乔木数据的基础上，结合 Landsat 的 TM 和 OLI 影像解译 1992、2000、2009 和 2016 年西双版纳植被空间分布数据，利用 Scaling 生态多样性指数（Yue et al., 2007），计算 4 个时期不同森林植被乔木多样性的变化，用灰色关联评价模型评价该地区森林植被乔木多样性的现状和变化情况，为西双版纳地区生物保护提供决策依据。

1 研究地概况

西双版纳（99°58′—102°00′ E， 21°09′—22°30′ N）位于云南省南部，北与普洱市相连、南与缅甸和老挝接壤（图 1）。地势呈现出东部和西部高，中部的澜沧江河谷地区海拔较低，西部和东部属于怒山山脉和无量山山脉的余脉。该区深受印度洋季风影响，属于热带季风气候，年均温为 18~21.7 ℃；降水季节变化明显，有明显的干、湿季之分，降水量约为 1 193~2 491 mm。西双版纳有 32 种较为典型的群系，分属于 7 个主要的植被（朱华等，2015）。深受气候和植被的影响，西双版纳地区海拔较低的热带雨林和季雨林分布着地带性的砖红壤，而季风常绿阔叶林分布赤红壤，石灰岩地区则分布有石灰土。



注：**TRF**. 热带雨林；**TSMF**. 热带季节性湿润林；**TEBF**. 热带山地常绿阔叶林；**COF**. 暖热性针叶林。下同。

Note: **TRF**. Tropical rainforest; **TSMF**. Tropical seasonal moist forest; **TEBF**. Tropical lower montane evergreen broad-leaved forest; **COF**. Tropical coniferous forest. The same below.

图 1 西双版纳地理位置和调查样地分布

Fig.1 Locations of Xishuangbanna and sample plots

2 研究方法

2.1 样地设置与调查方法

为了对比不同植被乔木多样性，以及计算 Scaling 生态多样性指数，本研究根据西双版纳森林植被分类的原则和依据（朱华等，2015），在西双版纳选取发育较完好、受人为活动影响较少的森林，分别设置了 4 个热带雨林、1 个热带季节性湿润林、2 个热带山地（低山）常绿阔叶林、1 个暖热性针叶林 4 种不同森林植被的调查样地（图 1），每个样地面积均为 2 500 m^2。识别并记录样地内所有胸径≧3 cm、高度≧3 m 的乔木个体，测定乔木个体的胸径、高度、盖度等信息。

2.2 植被分布与面积提取

为了获取 4 个时段不同植被面积，计算 Scaling 生态多样性指数，本研究利用西双版纳地区空间分辨率为 30 m 的 Landsat 的 TM、OLI 影像和 GDEMV2 的地形数据。在 ENVI5.3 软件的支持下，对每景影像进行 FLASSH 大气校正，选择短波红外、近红外、红波段和绿波段数据，用 Teillet 模块对影像进行地形校正，削弱大气和山体阴影对植被提取的影响；接着对影像进行目视解译，提取出阔叶林、暖热性针叶林、其它植被（包括竹林、灌木、草丛、栽培和水生植被等）。最后用 ArcGIS10.3 软件，将分类出来的阔叶林与海拔叠加，提取 1 000 m 以下的阔叶林即为热带雨林分布区（Li et al., 2009）；提取石灰岩山分布区（王洪等，1997）与阔叶林叠加，得出热带季节性湿润林分布区。2016、2009、2000 和 1992 年 4 个时段的 kappa 精度分别为 0.95、0.92、0.88 和 0.85。

2.3 多样性测度方法

本文使用 Simpson（*HS*）、Shannon-Wiener（*H*）、Scaling 物种多样性指数（*D'*）用于测算热带雨林、热带季节性湿润林、热带山地常绿阔叶林和暖热性针叶林的乔木多样性，使用 Scaling 生态多样性指数（*D*）用来对比西双版纳不同森林植被乔木多样性变化情况（Yue et al., 2005, 2007）。它们的计算式如下：

$$HS = 1 - \sum_{i=1}^{m} P_i^2 \quad (1)$$

$$H = -\sum_{i=1}^{m} P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D' = \ln(\sum_{i=1}^{m} p_i^{\frac{1}{2}})^2 \quad (3)$$

$$D = -\frac{\ln(\sum_{i=1}^{m} p_i^{\frac{1}{2}})^2}{\ln \varepsilon} \quad (4)$$

式中，p_i 为第 *i* 个乔木个体占样地全部乔木个体的比例；$\varepsilon = (e + A)^{-1}$，$e$ =2.718 28，*A* 表示调查对象的面积（ha）。

2.4 西双版纳森林乔木多样性评价

在计算出 4 个时段不同植被的 Scaling 生态多样性指数后，为了比较 4 个时期西双版纳生物多样性变化情况，本研究将灰色关联评价模型引入到不同时期之间西双版纳乔木多样性的评价对比。灰色关联评价模型通过反映曲线间的相似性来推测各指标的关联性（张绍良和张国良，1996），其优点是可以用少量且不同量纲的指标推测关联性，被广泛运用于各个领域。灰色关联度的步骤如下（邹淑涵等，2017；孙晓霞和王孝安，2006）：

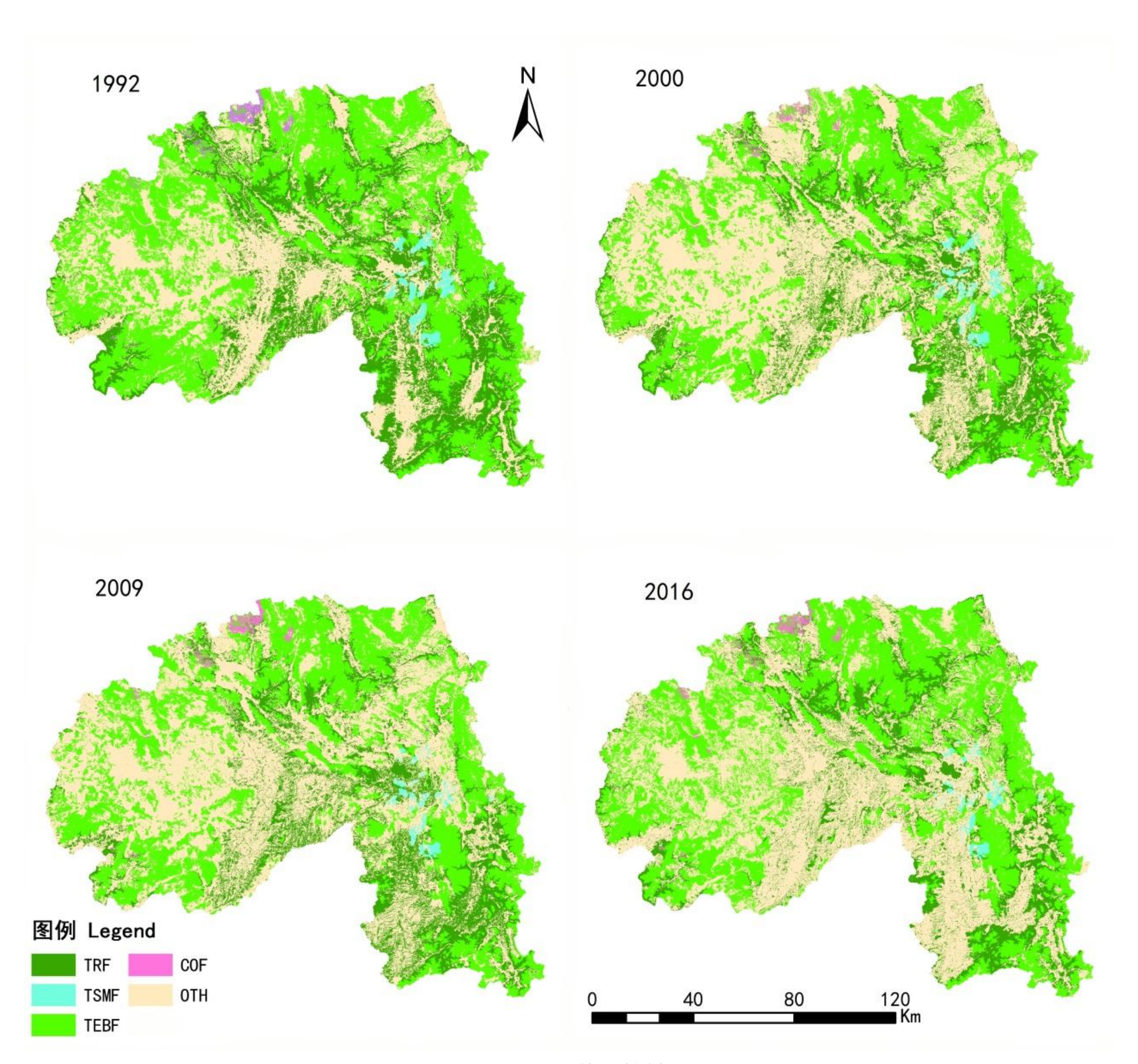
首先，设置参考数列 $X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \cdots, x_0(n)\}$，以及被比较数列 $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \cdots, x_i(n)\}$，$X_0$ 分别取每种植被在四个时期中 Scaling 生态多样性的最大值即为最优态，X_i 表示第 i 年各植被的 Scaling 生态多样性指数；其次，采用均值化方法对各植被的 Scaling 生态多样性指数进行无量纲化处理，表达式为 $x_i'(k) = \frac{x_i(k)}{\overline{X_i}}$，式中 $\overline{X_i} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_i(k)$，$k$ 表示不同的森林植被；接着，计算各个植被的生态多样性灰色关联指数，表达式为 $\gamma_{0i}(k) = \frac{\min\limits_i \min\limits_k |x_0'(k) - x_i'(k)| + \varepsilon \max\limits_i \max\limits_k |x_0'(k) - x_i'(k)|}{|x_0'(k) - x_i'(k)| + \varepsilon \max\limits_i \max\limits_k |x_0'(k) - x_i'(k)|}$，$\varepsilon$ =0.5；最后计算各个时期西双版纳乔木多样性的灰色关联评价指数，表达式为 $\gamma_{0i} = \sum_{k=i}^{n} \omega(k)\gamma_{0i}(k)$，式中 $\omega(k)$表示 4 种植被 Scaling 生态多样性指数得出的权重，计算公式为：$\omega(k) = \frac{\overline{X_k}}{\sum_{k=1}^{5} \overline{X_k}}$。

3 结果

3.1 森林植被面积变化

通过遥感影像解译的 4 个时期植被分布（图 2）看出，1992-2016 年期间，西双版纳森林面积总体呈现先下降后增加的趋势。其中热带雨林面积从 1992 年的 22.77%减少至 2016 年的 15.1%；作为面积最大的热带山地常绿阔叶林，从 1992 年的 41.6%减少到 2000 年的 33.61%和 2008 年的 33.35%，又增长至 2016 年的 38.4%；热带季节性湿润林、暖热性针叶林在西双版纳分布面积较小，都在 1.2%以下波动；然而其它植被的面积由 1992 年的 34.5%增长至 2016 年的 45.27%。

由图 2 还可看出，热带雨林主要分布在西双版纳中部和东部海拔较低的地区，热带季节性湿润林分布在中东部，热带山地季风常绿阔叶林在西双版纳地区均有分布，其它植被主要分布在地势较平缓的地区，暖热性针叶林分布在与普洱市接壤的北部。从时空对比得出，西双版纳植被变化剧烈，尤其表现为景洪市和勐腊县的低海拔热带雨林植被转变为其它植被；位于西双版纳中西部、西北部和东北部的热带山地常绿阔叶林转变为其它植被；勐腊县中部的低海拔的热带季节性湿润林转变为其它植被。



注： **OTH**. 其它植被。

Note: **OTH**. Other vegetation.

图 2 1992、2000、2009 和 2016 年西双版纳主要森林植被分布

Fig.2 Map of main forest vegetation types in Xishuangbanna in 1992, 2000, 2009 and 2016

3.2 样地森林植被乔木多样性对比

从各个样地的乔木物种数来看（表 1），热带雨林的平均物种数达到 55 种，是乔木物种数最多的植被；其次是热带山地常绿阔叶林的 35 种，高于热带季节性湿润林的 29 种和暖热性针叶林的 27 种。从乔木植株数来看，热带季节性湿润林的株数为 252 株，高于热带雨林的 220 株，而思茅松林的株数为 185 株，热带山地常绿阔叶林的株数最低为 151 株。而 3 个物种均匀度反映出西双版纳不同森林植被的均匀度排序为热带雨林>热带山地常绿阔叶林>暖热性针叶林>热带季节性湿润林。

表 1 西双版纳主要森林植被乔木多样性指数

Table1 Tree diversity indices of main forest vegetation types in Xishuangbanna

多样性指标 Diversity index	TRF	TSMF	TEBF	COF
单个样地面积(m^2) Area of each plot	2 500	2 500	2 500	2 500
样地数量 Plot number	4	1	2	1

平均物种数 Average species number	55±11.34	29	35	27
平均植株数 Average plant number	220±12.4	252	151	185
HS	0.95±0.01	0.46	0.85	0.53
H	3.45±0.28	1.35	2.70	1.54
D'	3.72±0.24	2.39	3.14	2.47

注: 数值=平均值±标准差; **TRF**. 热带雨林; **TSMF**. 热带季节性湿润林; **TEBF**. 热带山地常绿阔叶林; **COF**. 暖热性针叶林。下同。

Note: Value= $\bar{x} \pm s$; **TRF**. Tropical rainforest; **TSMF**. Tropical seasonal moist forest; **TEBF**. Tropical lower montane evergreen broad-leaved forest; **COF**. Tropical coniferous forest. The same below.

3.3 全区森林植被乔木多样性变化

通过各植被样地调查数据和遥感影像解译的植被数据，计算出西双版纳不同时段各植被乔木 Scaling 生态多样性变化（表 2）。从表 2 看出，热带雨林的 Scaling 生态多样性指数在 46 以上，是维持西双版纳森林乔木多样性最重要的植被。其次是热带山地常绿阔叶林和热带季节性湿润林，其 Scaling 生态多样性指数分别为 40 至 41 和 22 至 24。而以思茅松为优势种的暖热性针叶林，Scaling 生态多样性指数均低于 23。所以西双版纳各植被乔木多样性对西双版纳乔木多样性的贡献排序依次为热带雨林>热带山地常绿阔叶林>热带季节性湿润林>暖热性针叶林。

表 2 1992-2016 年主要森林植被乔木 Scaling 生态多样性指数及其权重[$\omega(k)$]

Table 2 Tree Scaling diversity index change and weight [$\omega(k)$] of main forest vegetation types from 1992 to 2016

植被 Vegetation	Scaling 生态多样性指数 Scaling diversity Index				$\omega(k)$
	1992	2000	2008	2016	
TRF	48.31	47.53	47.41	46.78	0.36
TSMF	23.90	23.47	22.84	22.81	0.17
TEBF	40.86	40.26	40.24	40.66	0.30
COF	22.87	21.64	22.84	22.73	0.17

利用灰色关联评价模型对 4 个时期西双版纳 4 种森林植被乔木 Scaling 生态多样性年际变化进行计算。从灰色关联指数变化趋势发现（图 3），热带雨林和热带季节性湿润林乔木多样性在研究期间具有持续减小趋势，热带山地常绿阔叶林乔木多样性则表现出先减少后增加趋势，暖热性针叶林呈现出上下波动态势。1992、2000、2009 和 2016 年西双版纳森林乔木多样性灰色关联评价指数分别为 1、0.58、0.63 和 0.62，所以 4 个时期西双版纳森林乔木多样性排序为 1992 年>2009 年>2016 年>2000 年。

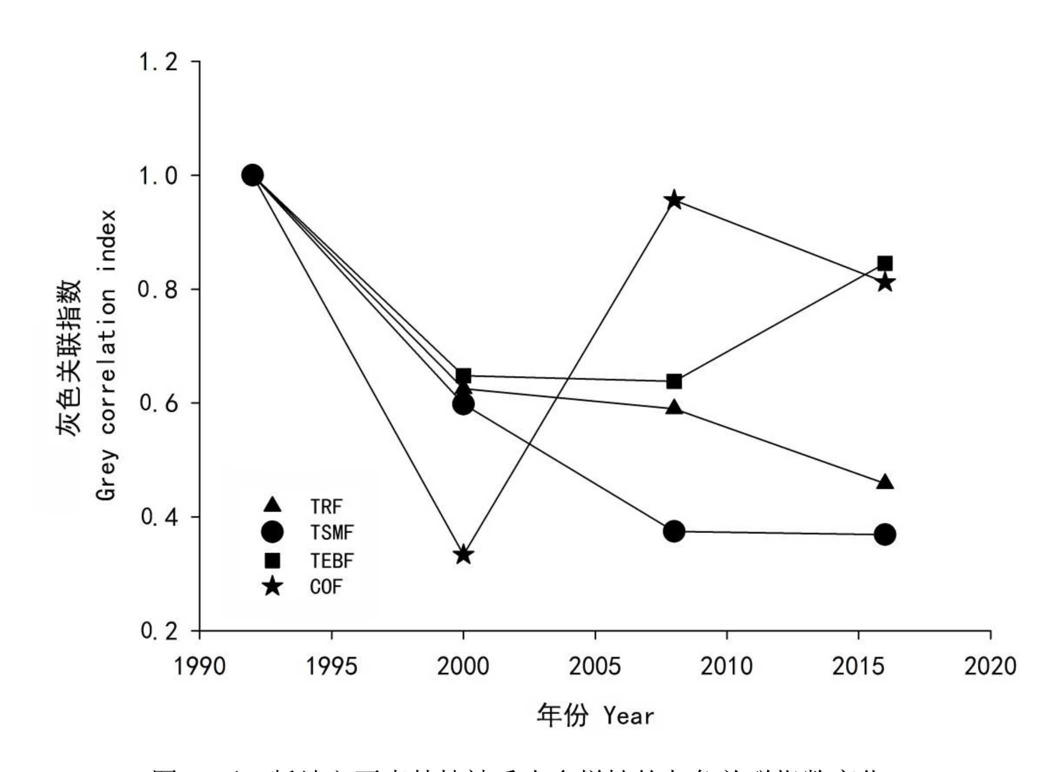


图 3 西双版纳主要森林植被乔木多样性的灰色关联指数变化

Fig 3 Change in grey correlational index of tree diversity of main forest vegetation types in Xishuangbanna

4 讨论

4.1 乔木多样性变化的原因分析

经济活动是导致西双版纳地区生物多样性丧失的主要原因。本研究结果表明，西双版纳森林植被乔木多样性从 1992-2016 年表现出持续丧失的态势，橡胶林和茶园等经济作物的种植是导致生物多样性丧失的主要原因（Li et al., 2007; 刘晓娜等，2014）。改革开放以来，随着生产和生活对橡胶的需求增加，更大面积的热带雨林被破坏形成橡胶林，而且 1992 年以来，橡胶林种植的海拔更是达到了 1 400 m（李增加等，2008），部分海拔较低的热带山地常绿阔叶林也被破坏形成了橡胶林。而西双版纳地区海拔较高的热带山地常绿阔叶林不适宜橡胶林的种植，所以 1990 年以来，热带山地常绿阔叶林则被破坏后形成了茶园（刘晓娜等，2014）。西双版纳分别于 1998 年和 2002 年实施了天然林保护工程（陈志萍，2015）和退耕还林工程（李保贵等，2015），在 2000-2009 年期间，西双版纳的热带雨林、热带山地常绿阔叶林的生物多样性丧失没有之前剧烈，而暖热性针叶林有所增加。但是 2009 年以后，由于经济活动的影响，橡胶价格的持续上涨，导致西双版纳大面积的热带雨林被破坏后形成橡胶林（刘晓娜等，2014），有悖于天保工程中热带雨林面积恢复和发展的目标（向艳平，2001）。

4.2 热带雨林维持区域生物多样性的意义

热带雨林是维持西双版纳森林乔木多样性最重要的植被。本研究表明，从对西双版纳森林乔木多样性的贡献来看，热带雨林在 4 个时期对西双版纳森林乔木多样性的贡献始终是排第一位的。因为热带雨林面积仅次于热带山地常绿阔叶林的面积，是西双版纳面积第二大的森林植被。同时，在相同面积样方里，热带雨林的乔木均匀度和丰富度远高于其他森林植被，多度也保持在较高的水平，所以单位面积的热带雨林造成的损失比其它森林植被造成的损失高（Cao & Zhang, 1997）。另外，生物多样性维持功能作为生态系统服务的重要指标，每公

顷热带雨林一年所创造生物多样性维持（生物调节和基因支持）的价值为 41 美元，其它森林则为 4 美元（Costanza et al., 1997），因此，从生物多样性价值评估来看，热带雨林丧失对区域生物多样性维持功能的影响更严重。

森林中稀有种的损失会导致森林生物多样性的丧失（Cao & Zhang, 1997），尤其体现在热带雨林和热带山地常绿阔叶林中。以思茅松和闭花木为优势种的暖热性针叶林和热带季节性湿润林中，其它乔木物种数占整个群落物种数的比重不高，所以其它乔木物种数的减少对这些植被的均匀度减少并不显著。然而在优势种不显著的热带雨林中，稀有种所占群落物种数的比例较高，稀有种的减少会影响到整个群落的生物多样性的丧失（朱华等，2002）。在热带山地常绿阔叶林中，虽然以壳斗科和樟科乔木为优势种，但是稀有种也占较高的比例。综上所述，森林中稀有种的损失对热带雨林和热带山地常绿阔叶林的影响更大。

4.3Scaling 生态多样性指数的适用性分析

Scaling 生态多样性指数结合遥感技术可以应用到区域生物多样性评估中。Scaling、Simpson 和 Shannon-Wiener 指数均可以测度群落均匀度，由于物种数随着面积的增大而增多，所以 Scaling 生态多样性指数还利用面积指数测度研究区内物种丰富度（Yue et al., 2007）。另外通过地面调查结合遥感技术还能够提取生态系统类型和监测植被的完整情况。传统区域生物多样性研究中与本研究中的 Scaling 生态多样性指数结合遥感技术，在物种丰富度、生态系统类型、植被完整性（万本太等，2007；朱万泽等，2009）这几个权重较高的指标相重合，说明 Scaling 生态多样性的测度指标结合遥感技术可以运用到区域生物多样性的评估中。但是不同样地面积和不同取样标准会导致多样性的计算结果没有对比性，为了使不同植被间的多样性计算结果有对比性，在群落调查中需要统一不同植被样地的取样标准。

Scaling 生态多样性指数在区域生物多样性评估中也存在问题。虽然已有学者得出了在 30 m 至 150 m 分辨率的空间尺度范围内，Scaling 生态多样性指数不受分辨率的影响（岳天祥等，2006），同时种-面积关系可以运用到生物多样性的尺度转换中（唐志尧等，2009）。但是物种多样性从群落尺度反演到区域尺度，尺度转换的难度受到取样效应和生境异质性的影响（唐志尧等，2009），尺度转换的难度也随着研究区的面积增大而增加，所以在面积较大或者异质性较高的研究区，Scaling 生态多样性指数的可靠性还需要进一步的研究。此外，如何将该指数运用到不同地区不同植被的比较，也还需要更深入的研究。灰色关联评价模型存在无量纲化处理缺乏保序效应、关联度的规范性不满足等（张绍良和张国良，1996）问题，在今后的工作中，还需要开发或利用相应的数学模型完善研究区森林植被乔木多样性的评价体系。

致谢　感谢朱华研究员、Sreehari Raman 博士和中国科学院西双版纳热带植物园西双版纳生态站在样地设置和植被分类给予的帮助和支持，谨此致谢！

参考文献：

CAO M, ZHANG JH, 1997. Tree species diversity of tropical forest vegetation in Xishuangbanna, SW China[J]. Biodivers Conserv, 6(7): 995-1006.

CHEN ZP, 2015. The economic and social benefits generated after the implementation of Natural Forest Protection Program in Jinghong[J]. J Green Sci Technol, 1: 138-139. [陈志萍，2015. 景洪实施天然林保护工程后所产生的经济效益与社会效益[J]. 绿色科技，1：138-139.]

COSTANZA R, RALPH A, GROOT R, et al., 1997. The value of the world’s ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 387: 253-260.

FU BJ, YU DD, LV N, 2017. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China[J]. Acta Ecol Sin, 37(2): 341-348. [傅伯杰，于丹丹，吕楠. 中国生物多样

性与生态系统服务评估指标体系[J]. 生态学报，37(2)：341-348.]
HU HD, LI XY, DU YF, et al., 2012. Research advances in biodiversity remote sensing monitoring[J]. Chin J Ecol, 31(6): 1591-1596. [胡海德，李小玉，杜宇飞，等，2012. 生物多样性遥感监测方法研究进展[J]. 生态学杂志，31(6)：1591-1596.]
LI BG, HUANG JB, LIU BH, 2015. Impacts of Sloping Land Conversion Program on Households' Sustainable Livelihood[J]. Biotech World, 3: 32-32. [李保贵，黄俊兵，刘柏和，2015. 退耕还林对农户可持续生计的影响[J]. 生物技术世界，3：32-34.]
LI HM, MA YX, LIU WJ, et al., 2009. Clearance and fragmentation of tropical rain forest in Xishuangbanna,SW,China[J]. Biodivers Conserv, 18(13):3421-3440.
LI HM, MITCH AT, MA YX, et al., 2007. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China[J]. Biodivers Conserv. 6(16): 1731-1745.
LI WJ, ZHANG SH, 2010. Research progress on GIS and remote sensing's application in ecological security assessment and Biodiversity conservation[J]. Acta Ecol Sin, 30(23): 6674-6681. [李文杰，张时煌，2010. GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多样性保护中的应用[J]. 生态学报，30(23)：6674-6681.]
LI ZJ, MA YX, LI HM, et al., 2008. Relation of land use and cover change to topography in Xishuangbanna, southwest China[J]. Chin J Plant Ecol, 32(5): 1091-1103. [李增加，马友鑫，李红梅，等，2008. 西双版纳土地利用/覆盖变化与地形的关系[J]. 植物生态学报，32(5)：1091-1103.]
LIU HM, XU ZF, DUAN QW, 2001. An approach to conserve plant diversity through the Dai's traditional beliefs in Xishuangbanna[J]. Guihaia, 21(2): 173-176. [刘宏茂，许再富，段其武，2001. 运用傣族的传统信仰保护西双版纳植物多样性的探讨[J]. 广西植物，21(2)：173-176.]
LIU JJ, SLIK JW, 2014. Forest fragment spatial distribution matters for tropical tree conservation[J]. Biol Conserv, 171: 99-106.
LIU XN, FENG ZM, JIANG LG, et al., 2014. Spatial-Temporal Pattern Analysis of Land Use and Land Cover Change in Xishuangbanna[J]. Resour Sci, 36(2): 233-244. [刘晓娜，封志明，姜鲁光，等，2014. 西双版纳土地利用/土地覆被变化时空格局分析[J]. 资源科学，36(2)：233-244.]
MYERS N, MITTERMEIER RA, MITTERMEIER CG, et al., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities[J]. Nature, 403:853-858.
Office of Biodiversity Protection in Ministry of Environmental Protection, 2010. Progress of the County Biodiversity Evaluation[J]. Environ Prot,(10): 23-26. [环境保护部生物多样性保护办公室，2010. 生物多样性县域评价试点与进展[J]. 环境保护，(10)：23-26.]
SUN XX, WANG XA, 2006. Study on soil fertility of forest type in Malan forest Region on the Loess Planteau[J]. Guihaia, 26(4): 418-423. [孙晓霞，王孝安，2006. 黄土高原马栏林区不同森林类型的土壤肥力研究[J]. 广西植物，26(4)：418-423.]
TANG ZY, QIAO XJ, FANG JY, 2009. Species-area relationship in biological communities[J]. Biodivers Sci, 17(6): 549-559. [唐志尧，乔秀娟，方精云，2009. 生物群落的种—面积关系[J]. 生物多样性，17(6)：549-559.]
WAN BT, XU HG, DING H, et al., 2007. Methodology of comprehensive biodiversity assessment[J]. Biodivers Sci, 15(1): 97-106.[万本太，徐海根，丁晖，等，2007. 生物多样性综合评价方法研究[J]. 生物多样性，15(1)：97-106.]
WANG H, ZHU H, LI BG, 1997. Vegetation on limestone in Xishuangbanna southwest China[J]. Guihaia, 17(2): 101-117. [王洪，朱华，李保贵，1997. 西双版纳石灰岩山森林植被[J]. 广西植物，17(2)：101-117.]

XIANG YP, 2001. Some understanding of the implementation of "Natural Forest Protection" Program in Xishuangbanna[J]. Yunnan For Invest Plan Des, 26(1): 10-14. [向艳平，2001. 对西双版纳实施"天保"工程的几点认识[J]. 云南林业调查规划设计，26(1)：10-14.]
XU WT, WU BF, 2005. Progress on measuring forest biodiversity with remote sensing technique[J]. Acta Ecol Sin, 25(5): 1199-1204. [徐文婷，吴炳方，2005. 遥感用于森林生物多样性监测的进展[J]. 生态学报，25(5)：1199-1204.]
YUE TX, 2000. Discussion on studying biodiversity by remote sensing[J]. Biodivers Sci, 8(3): 343-346. [岳天祥，2000. 生物多样性遥感研究方法浅议[J]. 生物多样性，8(3)：343-346.]
YUE TX, LIU JY, LI ZQ, et al., 2005. Considerable effects of diversity indices and spatial scales on conclusions relating to ecological diversity[J]. Ecol Model, 188:418-431.
YUE TX, MA SN, WU SX, et al., 2006. Theoretical analysis of ecological diversity models and their application in Fukang of Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Chin J Appl Ecol, 17(5): 867-872. [岳天祥，马胜男，吴世新，等，2006. 生态多样性模型的理论分析及应用：以新疆维吾尔自治区阜康地区为例[J]. 应用生态学报，17(5)：867-872.]
YUE TX, MA SN, WU SX, et al., 2007. Comparative analyses of the scaling diversity index and its applicability[J]. Int J Remote Sens, 28(7):1611-1623.
ZHANG SL, ZHANG GL, 1996. Comparison between Computation Models of Grey Interconnet Degree and Analysis on their Shortages[J]. Syst Eng, 14(3): 45-49. [张绍良，张国良，1996. 灰色关联度计算方法比较及其存在问题分析[J]. 系统工程，14(3)：45-49.]
ZHU H, WANG H, LI BG, et al., 2015. Studies on the Forest Vegetation of Xishuangbanna[J]. Plant Sci J, 33(5): 641-726. [朱华，王洪，李保贵，等，2015. 西双版纳森林植被研究[J]. 植物科学学报，33(5)：641-726.]
ZHU H, XU ZF, LI BG, et al., 2002. A discussion on the loss of biodiversity of tropical rain forest by Amomum planting underneath in south Yunnan[J]. Guihaia, 22(1): 55-60. [朱华，许再富，李保贵，等，2002. 砂仁种植对热带雨林植物多样性的影响探讨[J]. 广西植物，22(1)：55-60.]
ZHU H, XU ZF, WANG H, et al., 2000. Floristic composition and change of rain forest fragments in Xishuangbanna, southern Yunnan[J]. Biodivers Sci, 8(2):139-145. [朱华，许再富，王洪，等，2000. 西双版纳片断热带雨林植物区系成分及变化趋势[J]. 生物多样性，8(2)：139-145.]
ZHU H, XU ZF, WANG H, et al., 2001. Over 30-Year Changes of Floristic Composition and Population Structure from an Isolated Fragment of Tropical Rain Forest in Xishuangbanna[J]. Acta Bot Yunnan, 23(4): 415-427. [朱华，许再富，王洪，等，2001. 西双版纳片段热带雨林 30 多年来植物种类组成及种群结构的变化[J]. 云南植物研究，23(4)：415-427.]
ZHU WZ, FAN JR, WANG YK, et al., 2009. Assessment of biodiversity conservation important in the upper reaches of the Yangtze River: by taking county area as the basic assessment unit[J]. Acta Ecol Sin, 29(5): 2603-2611. [朱万泽，范建容，王玉宽，等，2009. 长江上游生物多样性保护重要性评价——以县域为评价单元[J]. 生态学报，29(5)：2603-2611.]
ZOU SH, CHEN YR, XU WF, et al., 2017. Impact factors of the total flavonoids content in Guizhou miao medicine Laporteabulbifera based on grey correlation analysis[J]. Guihaia, 37(4): 461-469. [邹淑涵，陈胤睿，徐文芬，等，2017. 基于灰色关联的苗药红禾麻总黄酮含量影响因子分析[J]. 广西植物，37(04)：461-469.]